

Tatu Toivanen

## HPF010-kilpa-auton runko

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Autoinsinööri  
Auto- ja kuljetustekniikka  
Opinnäytetyö  
16.8.2011

Tekijä(t) Otsikko	Tatu Toivanen HPF010-kilpa-auton runko
Sivumäärä Aika	24 sivua 16.8.2011
Tutkinto	Autoinsinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	yliopettaja Pekka Hautala
<p>Insinööriyössä suunniteltiin ja rakennettiin runko Formula Student -sarjaan osallistuvaan formulatyypiseen kilpa-autoon. HPF010-kilpa-auton rungon lähtökohtana toimi kilpa-auton edellinen versio HPF009, jonka ongelmakohdat pyrittiin ratkaisemaan uudessa rungossa.</p> <p>Työssä käsitellään ajoasentoa, hiilikuituvahvisteiden käyttöä, monokokin käyttämistä rungon takaosana, rungon 3D-mallintamista ja valmistusdokumenttien tekoa. Työn tarkoituksena on dokumentoida kilpa-auton rungon suunnittelu- ja valmistusprosessi. Suunnitteluprosessissa rautalankamallista tehdään 3D-malli, josta voidaan tehdä tarvittavat valmistusdokumentit alihankkijoille. Työssä kehitetään uusi tapa tehdä putkista valmistusdokumentit alinhankintaa varten.</p> <p>Rungon toteutukseen sisältyy materiaalihankinnat, osien alihankinta, kokoonpano ja jälkikäsittely. Työn runko kootaan jigiin laserleikatuista putkista TIG-hitsaamalla. Kokoonpanon jälkeen runko valmistellaan hiilikuituvahvisteiden laminointia varten. Hiilikuituvahvisteet laminoidaan alipaineella ja lämmöllä kiinteäksi osaksi runkoa. Runko maalataan kaksikomponenttimaalilla.</p> <p>Rungon hiilikuituvahvistukset todettiin kilpailukauden aikana toimiviksi. Uusi runkoputkien valmistusdokumenttien tekotapa vähensi työmäärää huomattavasti kokoonpanovaiheessa. Ajoasento epäonnistui ratin sijoittelun takia. Takamonokokki todettiin toimivaksi, mutta erittäin työlääksi ratkaisuksi.</p> <p>Kilpailukausi 2010 epäonnistui tekniikan toimimattomuuden takia, mutta auton runko toimi odotetulla tavalla. Työssä esiteltyjä hiilikuituvahvisteita ja uutta runkoputkien valmistusdokumentointitapaa käytetään myös vuoden 2011 auton suunnittelussa. Vahvisteiden käyttöä on laajennettu ja monipuolistettu.</p>	
Avainsanat	Formula Student, kilpa-auto, runko

Author(s) Title	Tatu Toivanen HPF010 Race Car Frame
Number of Pages Date	24 pages 16 Aug 2011
Degree	Bachelor of Automotive Design Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design
Instructor(s)	Pekka Hautala, Principal Lecturer
<p>A frame for a race car, which participates in the Formula Student race series, was designed and built in this Bachelor's thesis. Basis for the HPF010 frame is the previous version of race car HPF009. The new design aims to solve problems noticed with HPF009.</p> <p>This thesis deals with driving position, carbon fiber composite reinforcements, using monocoque structure in the rear end of the frame, 3D design of the frame and making manufacturing documents. The aim for this thesis is to document the design and manufacturing process of a race car frame. In the design process a wireframe model is transformed into a 3D model which is essential in making manufacturing documents for subcontractors. A new way to make manufacturing documents of frame tubes is invented in this thesis.</p> <p>Frame manufacturing involves material orders, part subcontracting, assembly and after treatment. Laser cut frame tubes are assembled into a jig and then welded together with TIG welding. After assembly the frame is prepared for carbon fiber composite reinforcements. The reinforcements are laminated to be part of the frame in negative pressure with heat. The frame is painted with two component paint.</p> <p>Carbon fiber composite reinforcements performed well during the racing season. The new manufacturing documentation reduced work load considerably at the assembly stage. Driving position failed because of wrong steering wheel positioning. The rear monocoque worked as expected but it was very laborious to manufacture.</p> <p>The racing season 2010 was technically unsuccessful, but the frame performed as expected. The carbon fiber composite reinforcements and the new manufacturing documenting practice are used also in designing year 2011 car. The use of reinforcements has been expanded and diversified.</p>	
Keywords	Formula Student, race car, frame

## Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoitteet	2
2	Suunnittelu	3
2.1	Konsepti	3
2.1.1	Ajoasento	3
2.1.2	Rautalankamalli	5
2.1.3	Takamonokokki	7
2.1.4	Rungon hiilikuituvahvisteet	8
2.2	Putkimalli	9
2.3	Komponenttien sijoittelu	11
2.4	Valmistusdokumentit	13
2.5	Suunnittelun alihankinta	14
3	Toteutus	15
3.1	Materiaalitulaukset	15
3.2	Alihankinta	16
3.3	Kokoonpano	17
3.4	Jälkikäsittely	19
4	Kokemukset	20
4.1	Runkoputkien laserleikkuumenetelmä	20
4.2	Kiinteä pohjalevy	20
4.3	Ajoasento	21
4.4	Takamonokokki	21
5	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet	22
	Lähteet	24

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

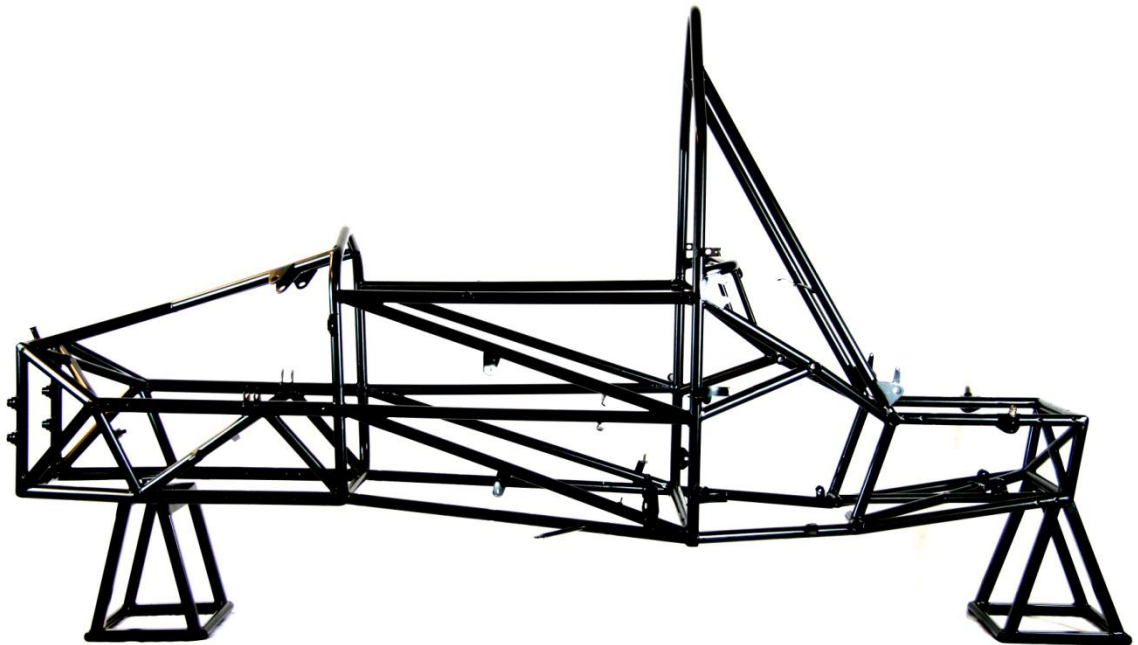
Helsinki Polytechnic Formula Engineering Team ry on vuonna 2000 perustettu opiskelijaprojekti, jonka tavoitteena on suunnitella ja rakentaa vuosittain formula-tyyppinen kilpa-auto kansainväliseen Formula Student -kilpasarjaan. Kilpasarja perustuu vuonna 1981 perustettuun amerikkalaiseen Formula SAE -kilpasarjaan. Formula Student -sarja kehitettiin vuonna 1998 luomaan FSAE:n kaltaisen kasvualustan eurooppalaisille tekniikan alan insinööriopiskelijoille. Sarjoihin osallistuvia tiimejä on ympäri maailmaan yli 500 ja uusia tiimejä syntyy jatkuvasti lisää.

Projekti tunnetaan nykyään nimellä Metropolia Motorsport. Sen alullepanija on jo eläkkeelle jäänyt yliopettaja Matti Parpola, joka kutsui projektiin auton suunnittelusta ja rakentamisesta kiinnostuneita opiskelijoita. Vuonna 2001 saatu menestys kilpailun suunnitteluluokassa johti suunnitelmien toteutumiseen HPF002-autona vuonna 2002. HPF002/3 auton jälkeen tiimi on rakentanut yhdeksän täysin uutta kilpa-autoa, joilla on saavutettu kärkituloksia ympäri maailmaa järjestetyissä kansainvälisissä Formula SAE- ja Formula Student -kilpailuissa. Näistä uusin auto on keväällä 2011 julkistettu HPF011, joka tulee olemaan tiimin viimeinen polttomoottorikäyttöinen auto. Kaudeksi 2012 tiimi tulee siirtymään täyssähköiseen Formula Student Electric -luokkaan. Syynä luokkamuutokseen ovat yhteiskunnan kasvavat paineet vihreämmistä liikkumismuodoista ja muiden kärkitiimien siirtyminen kilpailemaan sähköautoluokassa. Kaudella 2010 sähköautot osottautuivat jopa polttomoottorikäyttöisiä autoja nopeammiksi kilparadalla, joten muutos ei välttämättä ole huonoon suuntaan. Se on myös hyvä esimerkki tiimin erinomaisesta muuntaumiskyvystä muuttuvien haasteiden edessä.

Tiimin menestys on taannut projektin jatkumisen vuodesta toiseen ja tiimistä valmistuukin vuosittain keskimäärin noin viisi uutta insinööriä. Tiimi pysyy elinvoimaisena rekrytoimalla vuosittain uusia opiskelijoita projektiin. Tiimitoiminta syventää opinnoissa hankittua tietämystä ja mahdollistaa opetussuunnitelmaan kuulumattomien taitojen oppimisen omatoimisesti tiimin avustamana.

## 1.2 Tavoitteet

Tavoitteena tässä projektissa on hyödyntää aikaisempien vuosien rungoista saatua kokemusta suunniteltaessa uutta HPF009-auton runkoon (kuva 1) perustuvaa runkoa kilpailukaudelle 2010. Lähtökohtana on parantaa vanhan rungon rakennetta tarpeellisin osin. Lisäksi tavoitteena on kehittää suunnittelu- ja työskentelyprosessia työmäärän vähentämiseksi ja työnlaadun parantamiseksi. Suunnittelutavoitteena on tehdä rungosta edellistä vuotta kevyempi ja jäykempi, sovittaa ohjaamon koko tarkemmin mallinesäännön mukaiseksi, parantaa auton pohjalevyn rakennetta ja kehittää auton takapäälle uusi jäykempi rakenne.



Kuva 1. HPF009:n runko

## 2 Suunnittelu

### 2.1 Konsepti

#### 2.1.1 Ajoasento

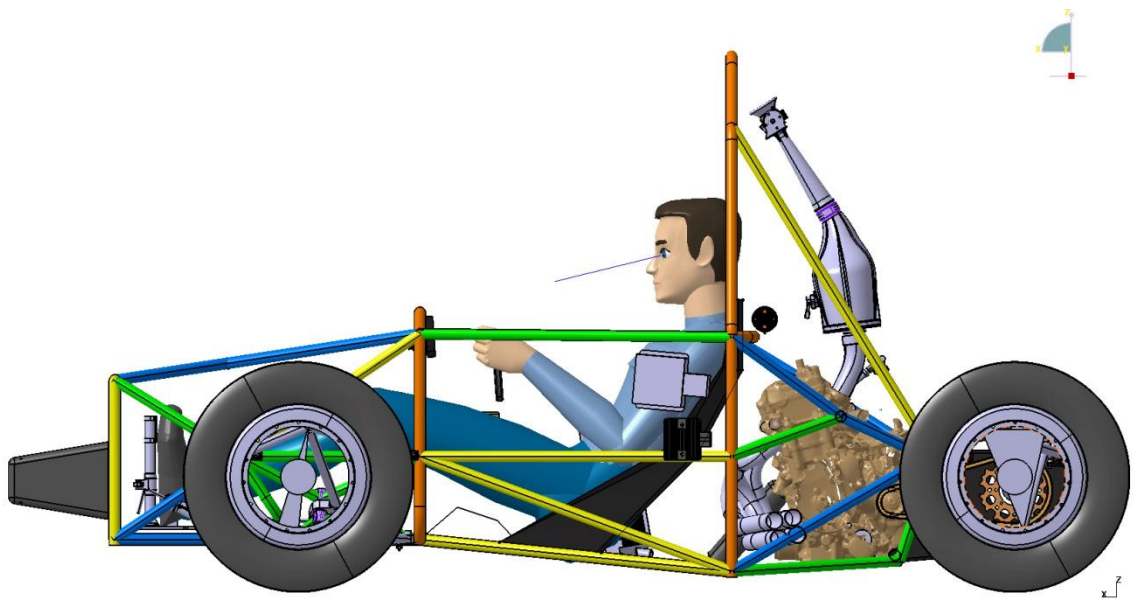
Ajoasento on alustapisteiden ja voimalinjan sijoittelun kanssa tärkeimpiä lähtökohtia suunniteltaessa formulatyypin kilpa-auton runkoa. Auton nopeuden eteen tehdyt muut ponnistelut muuttuvat turhiksi, jos kuljettaja ei pysty ajoasennon takia ajamaan autolla nopeasti. Uutta runkoa suunniteltaessa tulee pohtia, minkälaisessa ajoasennossa kuljettaja joutuu työskentelemään rankoissa kilpailuolosuhteissa. Formula Student –sarjassa kuljettaja joutuu pisimmillään ajamaan noin vartin ajan kestävyyskilpailussa täydellä vauhdilla. Vaikka kyseinen aika kuulostaa lyhyeltä, niin kokemukset osoittavat, että ellei kuljettaja ole erittäin hyvässä fyysisessä kunnossa, alkavat kierrosajat hidastua jopa useilla sekunneilla ajovuoron loppua kohden. Tämän takia maksimaalisen nopeaa autoa suunniteltaessa on otettava ehdottomasti huomioon kuljettajan jaksaminen pidemmässä ajosuoritteessa.

Ajoasento vaikuttaa huomattavasti kuljettajan kestävyYTEEN. Aikaisempien kokemusten mukaan HPF008:n erittäin makaava ja matala ajoasento on fyysisesti erityisen rasittava varsinkin kestävyysajossa. Rasittavuuden taustalla on liian suorana olevat kädet, jotka eivät saa vipuvartta tukeutumalla kylkiä vasten. HPF009:sään ajoasentoa muutettiin radikaalisti hyvin pystyksi. Kuljettajien mukaan tästä seurasi, että autolla pystyi ajamaan pitkiä aikoja ilman rasittumista. Tämä oli selkeästi muutos parempaan suuntaan, vaikka siitä seurasi myös auton painopisteen nouseminen. Auton painopistettä madallettaessa kuljettajan suhteellisen suuri massa ja ajoasennon pystyys vaikuttavat melko paljon painopisteen korkeuteen. Tämän takia ajoasennosta pitäisi pystyä tekemään kompromissi, jossa kuljettaja ei rasitu liikaa, mutta painopiste pysyy mahdollisimman matalana mahdollistaen auton paremman käyttäymisen radalla.

HPF010:n ajoasentoa suunniteltaessa palattiin HPF008:n erittäin makaavaan ajoasentoon. Tutkimalla HPF008:n ohjaamoä päädyttiin siihen, että sen ajoasennon rasittavuus ei johtunut varsinaisesti hyvin loivasta penkkikulmasta. HPF008:n penkki on lähes täysin suora, ja siitä puuttuu kokonaan kiinteät sivuttaistuet. Sivutukien virkaa

hoitavat jokaiselle kuljettajalle erikseen vaahdosta valetut soviterenkaat, jotka kiinnittyvät istuimen selkänojaan tarranauhalla. Kyseinen rakenne todettiin kisakaudella huonoksi, koska kuljettaja ei pysynyt kunnolla penkissä paikallaan. Selkänojan suoruudesta johtuen kuljettajan hartiat eivät pääse kunnolla lepoon vaan kuljettaja joutuu jännittämään ylävartaloaan jatkuvasti. Eräillä kuljettajilla tämä johti jopa siihen, että kuljettajan hartiat olivat selkeästi irti selkänojasta ajon aikana.

HPF010:ssä penkin selkänojan alaosa on yhtä loivassa kulmassa kuin HPF008:ssa ja yläosa on lähes yhtä pysty kuin HPF009:ssä. Tällä tavoin kuljettajan selkä saatiin kaarevaksi, joka on mukavampi asento kuin täysin suorassa penkissä. Lisäksi kuljettajan lantio siirtyi HPF009:sään verrattuna huomattavasti eteenpäin. Samalla kuljettajan hartiat laskivat ilman suurta muutosta niiden asennossa. Tällä tavoin saatiin yhdistettyä HPF008:san matalampi ajoasento HPF009:n kuljettajalle mieluisampaan ajoasentoon. Sivuttaistukiongelman päätettiin korjata hyvin jyrkillä ja syvillä penkin reunoilla, jolloin kuljettaja ei pääse liikkumaan sivuttain edes tiukimmissa mutkissa.



Kuva 2. Mannekiini alkuvaiheen hyvin karkeassa auton 3D-mallissa. Selkänojan kaarevuus on hyvin havaittavissa sivukuvasta.

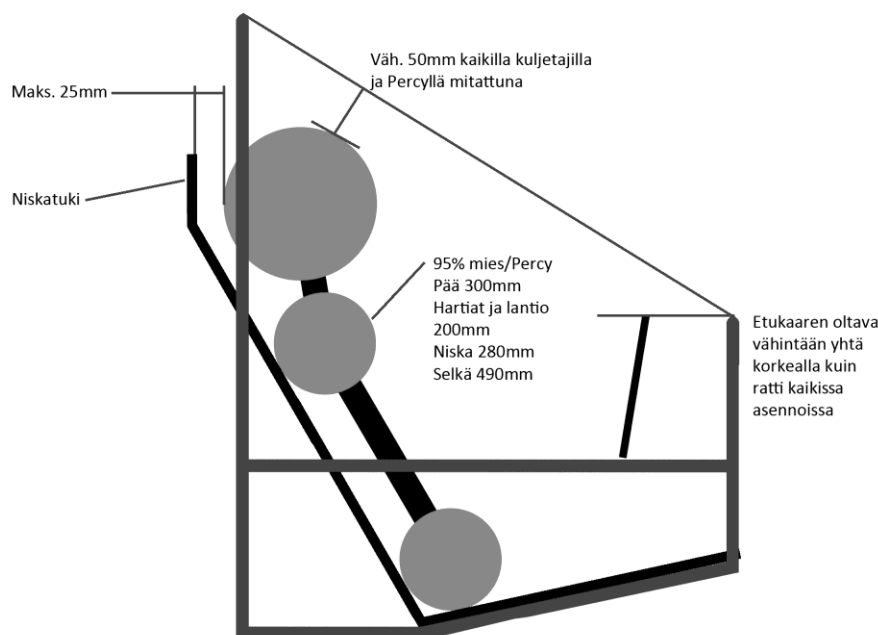
Varsinaista ajoasentoa hakiessa aloitimme sijoittamalla CATIAn mannekiinin karkeaan runkomalliin penkin kanssa (kuva 2). Mannekiinin mitoituksena käytimme hyvin keskimääräisen kokoisen pääkuljettajamme mittoja. Lisäksi käytössä oli myös pienikokoisimman kuljettajan mannekiini. Täten varmistettiin kaikkien kuljettajien



riittävä näkökenttä ulos autosta ja säädettävien polkimien säätövaran oikea mitoitus. Mannekiinin avulla määriteltiin CATIAan karkea ajoasento, jonka mukaan tehtiin tilamalli, jossa kuljettajat pääsivät kokeilemaan miltä ajoasento suurin piirtein tuntuu. Lisäksi tilamallissa päätettiin ratin lopullinen sijoitus kuljettajilta tulleen palautteen perusteella.

### 2.1.2 Rautalankamalli

Rungon rautalankamallia aletaan suunnitella siinä vaiheessa, kun on tiedossa karkeat alusta- ja moottorinkiinnityspisteet sekä kuljettajan ajoasento. Rautalankamallia käytetään, koska sen muokkaaminen on erittäin helppoa pelkästään pisteiden koordinaatteja muuttamalla. Täten voidaan luoda karkea malli rungosta, jota muokataan täyttämään sääntöjen vaatimukset rungon rakenteesta ja koosta. Tässä vaiheessa suunnitellaan myös etu- ja pääkaaren sopiva korkeus. Sääntöjen mukaan ratti ei saa missään asennossa olla sivusta katsottuna korkeammalla, kuin etukaari [1, s. 22]. Koska ratin paikka määriteltiin sopivaa ajoasentoa hakiessa, niin etukaaren korkeus ja muoto sovitetaan sääntöjen mukaisiksi. Pääkaaren korkeuden määrittää sääntö, jonka mukaan kuljettajan tai 95-prosenttisen miehen mallin (Percy) (kuva 3) pää ei saa ajoasennossa olla kahta tuumaa lähempänä linjaa, joka kulkee etu- ja pääkaaren välillä [1, s. 54].



Kuva 3. Osa rungon mitoitusmäärittelevistä säännöistä ja Percy

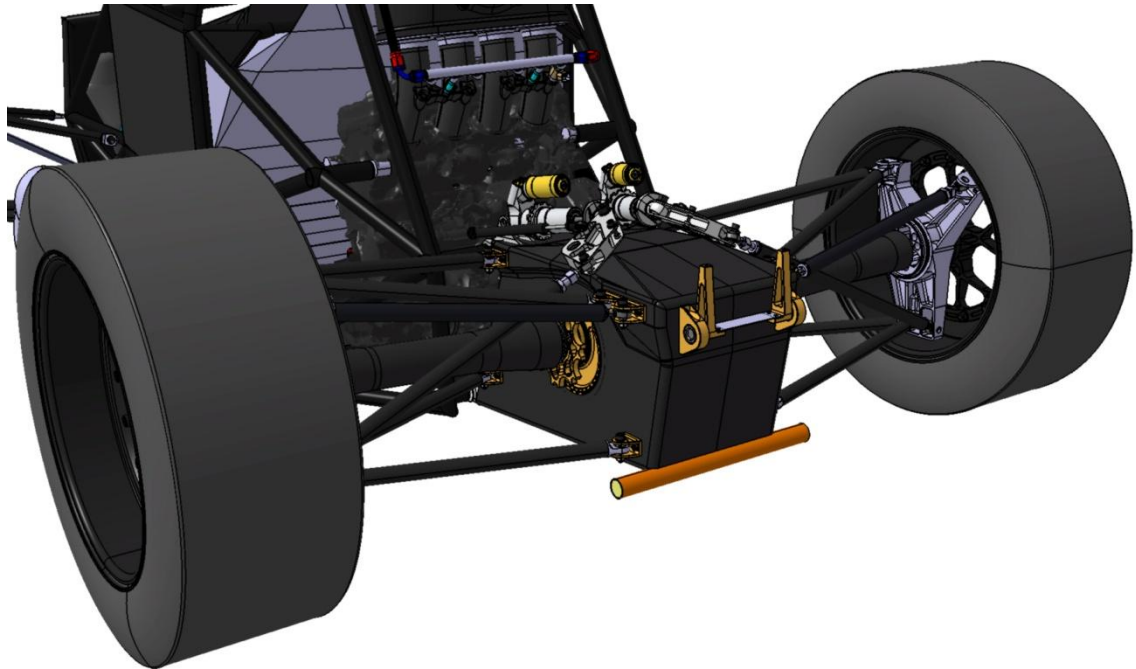
HPF010:n rungon suunnittelussa erityistä päänvaivaa aiheuttivat etupään jousituksen osien sijoittaminen ja tukeminen jäykästi runkorakenteeseen ja edellisvuoden autossa ongelmia aiheuttanut rungon peräpään rakenne. Etujousituksen kanssa päädyttiin sijoittamaan jousituksen vipuvarret rungon tukiputkien risteyskohtaan runkoputkien väliin osaksi rungon rakennetta. Täten etujousitus saatiin sijoitettua niin, että kaikki sen pisteet olivat rungon risteyskohdissa, jotka ovat erittäin jäykkiä ja jotka jakavat jousituksesta tulevat voimat tasaisesti ympäri runkoa.

Takarungon rakenteesta haluttiin tehdä kapea HPF007-tyylisesti, jotta perän rakenteesta saisi tehtyä helpommin jäykän ja voimansiirto jäisi perän rakenteen ulkopuolelle. Takarungon etummaiset pisteet pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle moottorin kiinnityspisteitä, jotka ovat erittäin jäykät verrattuna rungon muihin pisteisiin. Lisäksi rakenteesta haluttiin tehdä mahdollisimman suljettu. Kuutionmuotoinen putkirakenne pääsee elämään hyvin helposti, koska kuution tahkot pääsevät muuttamaan muotoa vinokkaiksi voimien alaisina. Tätä elämistä voidaan vähentää lisäämällä diagonaalisia tukia kuution tahkoihin eli kolmioimalla rakenne. Muotona kolmio on neliötä huomattavasti parempi, koska rasitukset jakautuvat näin paremmin. Kun rakennetta halutaan entisestään jäykistää ja keventää, niin diagonaaliputket voidaan korvata tahkot peittävillä levyillä. Tällöin rakenteeseen tulevat voimat synnyttävät levyihin repivää voimaa, joka jakautuu levyn suuremman pinta-alan takia paremmin.

HPF010:n tapauksessa perän rakennetta yritettiin jäykistää ensin perinteisellä putkikehikolla, johon lisättiin mahdollisimman monta tukiputkea. Tästä seurasi, ettei perähäkin sisään sijoitettaviin komponentteihin pääsisi käsiksi eikä voimansiirtoa saisi sijoitettua. Jotta kaikki voimansiirron osat olisi saatu mahtumaan paikalleen, olisi perän rakenne pitänyt jättää sivuistaan avoimaiseksi samanlailla kuin HPF009:ssä. Ongelma pyrittiin ratkaisemaan korvaamalla perähäkin sivujen ristikkäistuet hiilikuituisilla vaahtotäytteisillä komposiittilevyillä. Komposiittien käyttöä perähäkissä mietittiin tarkemmin ja todettiin putkirakenne turhaksi komposiittilevyjen runkorakenteena. Niinpä koko perän rakenne päätettiin valmistaa yhtenäisestä hiilikuitukomposiittiosana.

### 2.1.3 Takamonokokki

Rungon peräosasta päätettiin tehdä irroitettava monokokki, joka kiinnittyy rungon ja moottorin taai'imaisten kiinnityspisteiden väliin. Monokokin materiaaliksi päätettiin rakennevaahdolla jäykistetty hiilikuiturakenne. Perään integroitiin mahdollisimman paljon takapään komponentteja. Tasauspyörästö sijaitsee monokokin sisällä, ja se on kiinnitetty monokokkiin integroitujen epäkeskeisten kiinnikkeiden kautta. Täten ketjun vällys voidaan säätää sopivaksi pyörittämällä epäkeskeistä kiinnikkettä. Alustapisteet voitiin valita hieman vastaavaa putkirakennetta vapaammiin, koska monokokin muoto on vapaammin valittavissa. Takapästä saatiin erittäin kapea ja tukivarsista mahdollisimman pitkät. Näin tukivarsien kulmamuuotokset pysyvät mahdollisimman pieninä ja jousitus toimii mahdollisimman lineaarisesti [3, s. 46]. Monokokin sisään laminoitiin alumiinipaloja kiinnikkeiden kohdalle ja niihin tehtiin helicoil-kierteet, joihin kiinnikkeet kiinnittyvät ruuveilla. Tiimin vastuulla oli suunnitella monokokin ulkomuoto ja sijoittaa kaikki tarvittavat komponentit siihen (kuva 4). Monokokin rakenteellinen suunnittelu toteutettiin alihankintana.



Kuva 4. Takamonokokki komponentteineen

#### 2.1.4 Rungon hiilikuituvahvisteet

HPF010:tä suunniteltaessa päätettiin korjata HPF009:ää vaivannut pohjalevyn irtonaisuus rungosta. HPF009:n pohjalevy on kahden hiilikuitupinnan väliin laminoitu 10 mm paksu rakennevaahtolevy. Levy itsessään on hyvin jäykkä ja kevyt. Se on kiinnitetty runkoon 6 mm:n pulteilla noin 20 cm:n välein. Jo testikaudella huomattiin levyn kautta vaikuttavat voimat niin suuriksi, että osa pulteista joko vääntyi tai katkesi. Tähän ongelmaan haettiin ratkaisua liimaamalla levy runkoon kiinni. Se auttoi väliaikaisesti, mutta kilpailukauden loputtua pohjalevy oli monesta kohtaa irti. Seuraavaa autoa suunniteltaessa oli selvää, että pohjalevystä pitää saada osa auton runkoa.

Kun eri vaihtoehtoja pohjalevyn rakenteeksi tutkittiin, löydettiin SAE-paperi, jossa Minnesotan yliopiston FSAE-tiimi tutkii erilaisia hiilikuitukennolevyjen kiinnitystapoja rungon vahvistukseen [2]. Tutkimuksessa käytetään valmiita lentokoneteollisuuden käyttämiä komposiittilevyjä, joissa kevyt hunajakkenno on liimattu kahden hiilikuituisen pinnan väliin. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää paras keveys-jäykkyysuhde eri kiinnitystapojen välillä. Tutkitut kiinnitysmenetelmät ovat ruuvi- ja niittiliitos sekä levyn liimaaminen putkirakenteeseen. Ruuvi- ja niittiliitoksissa on myös tutkittu liitosvälin vaikutusta runkorakenteen jäykkyyteen. Testin tuloksena liimattu vahvistelevy saavuttaa parhaan keveys-jäykkyysuhteen. Testin tehnyt tiimi epäilee rakenteen kestävyttä ja päätyy käyttämään niitattua rakennetta.

Päätimme testata SAE-paperissa esitettyä liimattua rakennetta. Testiä varten teimme 25 mm:n putkesta neljä suorakaiteen muotoista testikappaletta, joita vedettiin nurkista [kuva 5]. Verrokkina testissä käytettiin kehikkoa, jossa ei ollut laisinkaan tukea. Normaalial runkorakennetta vastasivat testikappaleet yhdellä ja kahdella diagonaaliputkella. Varsinaisena testikappaleena käytettiin kehikkoa, johon liimattiin hiilikuituiset pinnat nomex-paperisen hunajakennon päälle. Hiilikuituvahvisteinen rakenne on tupladiagonaalirakennetta noin 10 % kevyempi ja 10 % vahvempi. Vetotestit suoritettiin Metropolia ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa.



Kuva 5. Testikappale vetokokeessa

Koska vetokokeiden tulokset olivat positiivisia, päädyttiin ohjaamon sivuseinät tekemään samalla tavalla kuin pohjalevy. Levy korvaa samalla diagonaalin etu- ja pääkaaren välillä. Käyttämämme runkorakenne on hyvin harvinainen kilpailuissa. Runko on hybridirunko, joka yhdistää putkirungon helpon rakennettavuuden ja hiilikuitumonokokin jäykkyyden ja keveyden.

## 2.2 Putkimalli

Kun rungon rautalankamalli on vähintään 95-prosenttisesti muuttumaton, voidaan alkaa tehdä putkimallia sen pohjalta. Putkimallin tekeminen on tärkeä osa muun auton suunnittelutyötä, koska näin varmistetaan, että kaikki osat sopivat olemaan omilla paikoillaan, kun autoa aletaan panna kokoon. Rungon jokaisesta putkesta tehdään erillinen osa CATIAssa. Pituusakselilla symmetriset putket voidaan peilata toiselle puolelle runkoa ja näin säästetään hieman työmäärässä. Viivamalli ennen putkimallia on ehdoton, koska siinä on jokaisen putken oikea pituus tuhannesosamillilleen. Se on tärkeää, koska rungon kokoonpano tehdään liittämällä putkien päissä olevat pisteet toisiinsa. Jos putken pituus heittää edes tuhannesosan, niin CATIA ei pysty liittämään

putkia toisiinsa johtuen siitä, että kaikki putket ovat yhteydessä toisiinsa. Tästä syystä myös putkia ja rungon rakennetta jälkikäteen muokatessa pidettävä huolta kaikki putkien oikeista pituuksista, ettei CATIA anna satoja virheilmoituksia mahdottomista vapausasteiden rajoitteista.

Putkien osien tekeminen aloitetaan luomalla kaksi pistettä uuteen osaan. Toinen piste sijoitetaan origoon ja toinen vapaavalintaiselle akselille putken tarkan pituuden etäisyydelle origosta. Tämän jälkeen piirretään putken profiili tasolle, jonka läpi pisteiden luoma kuvitteellinen akseli kulkee. Tämä profiili pursotetaan aluksi samanmittaiseksi kuin putken pituus. Rungon jokainen putki talletetaan omaksi tiedostokseen ja nimetään juoksevilla osanumerolla. Osanumeroinnin tarkkuus ja putkien nimeäminen heti putkia tehdessä säästää paljon vaivaa kustannusarviota laadittaessa, jolloin jokainen putki on pystyttävä identifioimaan omaksi yksilökseen.

Rungon kaarevat putket tehdään kahdella eri tavalla riippuen siitä, ovatko taitokset yhdessä vai useammassa tasossa. Yhdessä tasossa olevan putken päätepisteiden välinen etäisyys merkitään samaan tapaan kuin suorissa putkissa. Näiden pisteiden väliin piirretään haluttu muoto ja tämän jälkeen putken profiili pursotetaan tätä selkärankaa pitkin kaarevaksi putkeksi. Moneen suuntaan taivutettu putki määritellään ensin neljällä tai useamalla koordinaatistoon sijoitetulla pisteellä, minkä jälkeen pisteiden väliin piirretään pyöristetty murtoviiva. Siihen voidaan määrittää oikea taivutussäde jokaiselle risteyskohdalle erikseen. Koska murtoviiva ei välttämättä kulje määritellyn pisteen kautta, mitoitus saattaa vaatia kyseisen osan mitoitusta kokeilemalla rungon kokoonpanossa. Kun murtoviiva on määritelty halutun muotoiseksi, niin putken profiili pursotetaan samaan tapaan selkärangan ympärille kuin yhdessä tasossa olevan kaarevan putken kanssa.

Rungon putkimallin kokoaminen kannattaa aloittaa sijoittamalla kokoonpanoon etu- ja pääkaari ja etummainen tulipelti (bulkhead). Tämän jälkeen lisätään rungon ulkomitat määrittävät putket. Putket kiinnitetään päissä olevista pisteistä jo kiinnitettyjen putkien pisteisiin 0 mm pitkällä pituusmitalla. Tämän takia on tärkeää, että putken pisteet ovat tuhannesosalleen yhtä pitkällä toisistaan kuin kahden kiinnitetyn pisteen etäisyys toisistaan, joiden väliin putki on tulossa. Pituusakselilla symmetriset putket voi peilata

kokoonpanoa tehdessä toiselle puolelle. CATIA luo automaattisesti uudet tiedostot, mutta tiedostot pitää nimetä ja tallentaa manuaalisesti.

Putken päiden leikkaaminen kannattaa tehdä viimeisenä ennen työkuvien tekoa. Täten runkoa on helpompaa ja nopeampaa muokata tarvittaessa. Putket leikataan Boolean-operaation avulla, jossa leikattavasta putkesta poistetaan toisen putken kanssa risteävä osa. Osaa putkien pursotuksista voi saattaa joutua lyhentämään tai pidentämään, jotta leikkaus ei ole keskellä putkea tai sen ulkopuolella. Koska leikkaavat osat ovat myös onttoja, leikattuun putkeen jää irtonaisia paloja. Niistä pääsee eroon käyttämällä `remove lump` -toimintoa. Osa ylimääräisistä paloista on erittäin ohuilla säikeillä varsinaisessa putkessa kiinni, joten niitä ei edellä mainitulla työkalulla voi poistaa. Tällöin säie pitkää katkaista manuaalisesti ennen hukkapalan poistamista. Putkea leikatessa pitää olla valmis suunnitelma putkien kokoamisjärjestyksestä. Muuten saattaa syntyä tilanne, jossa putki pitää asetella toisessa putkessa olevaan reikäkohtaan. Lisäksi kokoamisjärjestyksessä on hyvä huomioda tärkeiden putkien ympärihitausmahdollisuus.

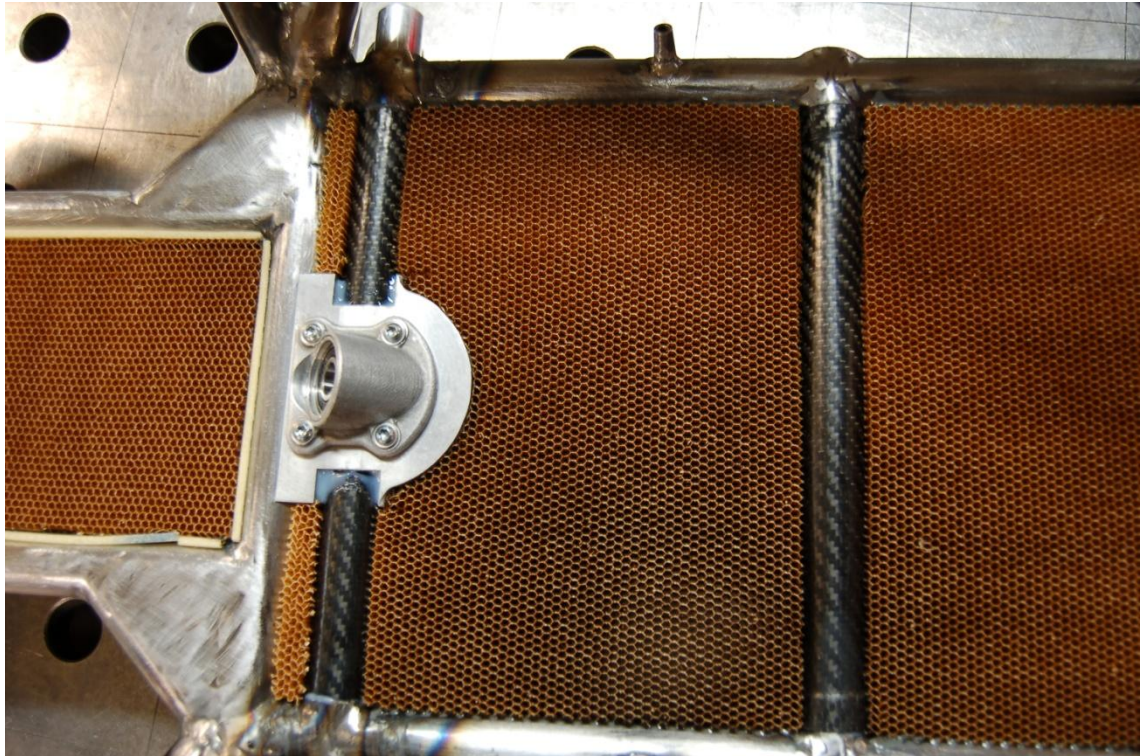
### 2.3 Komponenttien sijoittelu

Kun rungon putkimalli on tuotu auton pääkokoonpanoon ja kun runkoon kiinnitettävät komponentit ovat lopullisilla paikoillaan, voidaan alkaa suunnitella kiinnikkeitä rungon ja komponenttien väliin. Mahdollisimman monesta runkoon tulevasta kiinnikkeestä pyrittiin suunnittelemaan runkoon kiinteästi hitsatuksi. HPF009-autossa lähes kaikki komponentit olivat ruuvikiinnitteisiä, mistä seurasi suuri määrä holkitettuja reikiä runkoputkissa. Se aiheutti paljon työtä putkien holkituksessa ja ne myös heikensivät rungon rakennetta hieman. Hitsatut kiinnikkeet ovat helppoja ja halpoja valmistaa laserleikkuulla teräslevystä ja helppoja kiinnittää runkoon. Hitsattuja kiinnikkeitä ei pysty tosin käyttämään paikoissa, joissa kiinnikkeen tarvitsee jostain syystä olla irrotettava.

Auton eturungossa pohjalevyn sisään sijoitettiin raidetanko ja kallistuksenvakaaja. Molemmissa on kummassakin päässä laakeripesät, jotka hitsattiin runkoputkien väliin. Pohjalevyn sisällä on hiilikuidusta valmistetut putket, jotka pitävät raidetangon ja



vakaajan akselin eristyksissä pohjalevyn täyteaineesta ja vahvistavat rakennetta. Komponentit sijoitettiin pohjalevyn sisään, jotta ohjaamon pohjasta saatiin tasainen ja jotta säädettävä poljinkelkka mahtuu liikkumaan vapaasti ilman esteitä (kuva 5).



Kuva 6. Pohjalevyn sisään sijoitetut raidetanko ja kallistuksenvakaaja

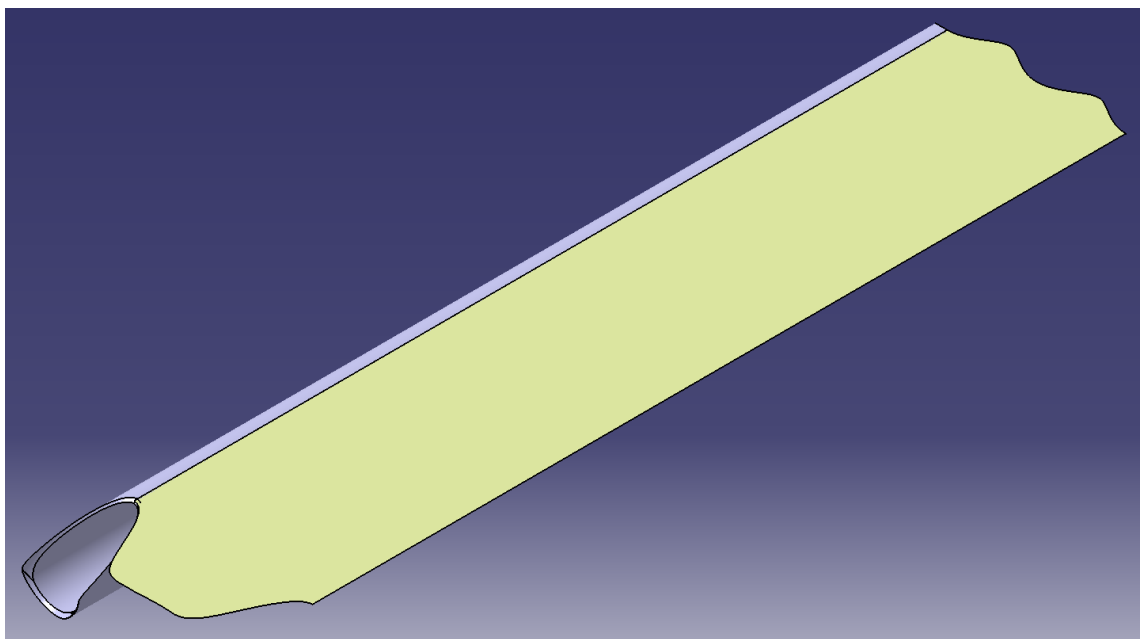
Etujousituksen sijoittaminen runkoon tuotti erityistä päänsä, ja lopputulos onkin aikaisempiin toteutuksiin nähden melko erikoinen. Jouset haluttiin sijoittaa HPF008: n tapaan auton pohjalle pitkittäin. Ongelmaksi muodostui jousituksen keinuviipujen sijoittaminen, koska niiden läheisyydestä ei kulkenut yhtään sopivaa putkea, johon keinuviipun olisi voinut akseloida ja toisaalta rungon diagonaaliputket olivat keinuviipun tiellä. HPF008 sai kilpaillessaan moitteita tuomareilta keinuviipujen huonosta tuennasta, joka mahdollisti keinuviipujen epätoivotun liikkumisen joustoliikkeiden aikana. Muuttunut kinematiikka saa jousituksen toimimaan suunnitellusta poikkeavalla tavalla, joka hidastaa autoa ääriajoilla ajettaessa. Jousituksen keinuviipun akselista päätettiin tehdä rungon rakenteellinen osa ja siihen liittyikin neljä diagonaaliputkea. Täten keinuviipu on tuettu erittäin jäykästi paikoilleen, mutta mahtuu silti olemaan runkoputkien keskellä.



## 2.4 Valmistusdokumentit

Jotta runkoon vaadittavat osat pystyttiin teettämään alihankintana, niin osista jouduttiin laatimaan työkuvat. Runkoputkista tehdään aukilevityskuvat DXF-muodossa CNC-käyttöistä putkilaseria varten. Taivutettavista kaarista tehdään työkuvat, joissa ilmoitetaan taivutusten asteluvut ja etäisyys toisistaan. Runkoon hitsattavat kiinnikkeet tilataan DXF-kuvilla laserleikkauksella.

Aikaisempina vuosina laserleikattujen runkoputkien kanssa huomattiin, että putkiin jouduttiin hiomaan käsin viisteet ennen rungon kokoonpanoa. Tästä seurasi huomattava työrasite runkoa rakentaessa. Koska olin itse kokenut tämän hankaluuden edellisen vuoden runkoa kokoonpannessa, päätin yrittää keksiä siihen ratkaisun. Ongelman ydin on CATIAssa putkepäitä leikatessa syntyvät viisteet. Kun putken aukilevitys (kuva 6) tehdään sen ulkopinnalta, niin laserleikatusta putkessa putken seinämä on täyspaksua myös viisteen kohdalta. Putkilaser leikkaa putkea kohtisuoraan, joten sillä ei ole mahdollista tehdä viisteitä putkiin. Putkiin joudutaan hiomaan käsin viiste, jotta putket saadaan sovitettu toisiinsa. Tämän jälkeen viiste joudutaan hiomaan pois, koska ohutta viistettä on hankala hitsata paksumpaan putkeen. Lisäksi saatu sauma on huomattavasti perusputkea heikompaa. Ongelmaa miettiessäni tajusin, että putken sisäpuolinen leikkaus on juuri oikeankokoinen ja täten putket liittyvät toisiinsa saumattomasti suoraan laserleikkauksesta tullessaan.



Kuva 7. Leikattu putki ja sen aukilevitys

Keksin siis tavan, jolla rungon kokoonpanossa tehtävää käsityötä pystyttiin vähentämään useita tunteja. Nyt täytyi vielä keksiä, kuinka saman pystyy toteuttamaan CATIAssa. Ratkaisu ongelmaan löytyy CATIAN pintamallinnusmoduulista, jossa putken sisäpinnan pystyy projisoimaan ulkopinnalle. Tämän jälkeen ulkopinnan pintamallista poistetaan ylimääräiset osat ja tehdään aukilevitys, joka lähetetään DXF-muodossa putkilaseralihankkijalle. Alihankkijamme huomasi, että CATIAN tuottamat DXF-kuvat jäävät viivojen päistä aukinaisiksi. Koska putkilaserkoneen ohjaus ei ymmärrä kuvaa, jossa viivat eivät ole yhtenäisiä, joutuivat Putkilaser oy:n työntekijät korjaamaan työkuvat koneelle sopiviksi. Tämä tieto huomioitiin seuraavan vuoden auton putkia tilatessa.

## 2.5 Suunnittelun alihankinta

Auton takamonokin lujuuslaskennat ulkoistettiin Componeering Oy:lle, joka on toiminut yhteistyössä tiimin kanssa hiilikuiturakenteiden lujuus- ja ominaisuuslaskentaan liittyvissä asioissa. Tiimin käyttämällä EsaComp-ohjelmalla voidaan laskea hiilikuiturakenteiden lujuusominaisuuksia. Takamonokokin monimutkainen geometrinen muoto on erittäin monimutkainen laskettava hiilikuiturakenteita mitoittaessa. Componeering Oy on kehittänyt Ansys FEA-laskentaohjelmaan esi- ja jälkikäsittelymoduulin, jossa EsaComp-ohjelmalla lasketut lujuusominaisuuslaskut yhdistetään Ansysissä 3D-malliin. HPF010:n suunniteluvaiheessa moduuli oli vasta koekäytössä. Ohjelmistoa käytetään kaupallisesti esimerkiksi valtameripurjehdukseen sopivien kilpaveneiden runkojen suunnitteluun. Ansysissä on mahdollista luoda malliin rasituksia normaalin FEM-ohjelman tavoin. Componeering Oy:n kehittämän esi- ja jälkikäsittelymoduulin avulla voidaan mitoittaa komposiittirakenteesta riittävän kestävä. Ansysillä myös mitoitettiin alustapisteitä varten rakenteen sisään sijoitettujen inserttien riittävä liimauspinta-ala.

Componeering Oy:lle toimitettiin takamonokokin 3D-malli, joka täytti monokokin mekaaniset vaatimukset. Malliin laskettiin sopiva komposiittirakenne, jotta monokokki kestää asetetut rasitukset. Jälkikäsittelymoduuli muodostaa mallista sopivat kaavat ja laminointiohjeet, joiden mukaan tiimi valmisti takamonokokin. Näin syntyy rakenne, joissa tarvittavat kohdat ovat vahvistettuja, ja kohdat, joissa ei ole paljon voimia ovat

kevyempiä. Ohjelma huomioi laskennassa materiaalien kuitusuunnan, jotta voimat jakautuvat parhaalla mahdollisella tavalla.

### **3 Toteutus**

#### **3.1 Materiaalitulaukset**

Rautaruukki oy on toiminut Metropolia Motorsport -tiimin tukijana, joten materiaalivalintoja tehdessä Ruukin tuotteet olivat tietenkin ensisijalla. Ruukin valikoimista päädyimme valitsemaan aikaisina vuosina hyväksihavaitun Form 800 -sarjan. Form 800 on kaksifaasisesta korkealujuusteräksestä valmistettua ohutseinämäistä saumallista kylmä- tai kuumavalssattua putkea. Siinä yhdistyy suuri murtolujuus ja hyvät venymäarvot. Form 800 -putken myötölujuus on vähintään 600 MPa ja murtolujuus vähintään 800 MPa 10 %:n murtovenymällä (liite 1). Lisäksi Form 800 -putket ovat muokkauskovettuvia, mikä on hyvä ominaisuus esimerkiksi kolaritilanteessa, jolloin auton runko imee törmäysenergiaa samalla muuttuen erittäin kovaksi. Muokkauskovettuvuudesta ei ole haittaa tässä käyttökohteessa, koska mahdollisen kolaritilanteen jälkeen auton runko jouduttaisiin rakentamaan kuitenkin lähes kokonaan uudestaan oikaisemisen sijaan.

Putkia tilatessa piti ottaa huomioon niiden 6 metrin toimituspituus. Putket noudettiin itse Ruukin Riihimäen varastolta, joten oli otettava huomioon niiden mahtuminen ammattikorkeakoulun kuorma-autoon. Sponsorisopimukseen kuului periaatteellisesti rajaton määrä Ruukin tuotteita, mutta rajalliset säilytystilat koululla estivät ottamasta putkea ylettömästi varmuuden varalta. Putkitilauksessa laskiessa putkia tilattiin kaksinkertainen määrä, jottei syntyisi materiaalipulaa, jos valmistuksen yhteydessä jokin olisi mennyt vikaan. Runkoa varten tilattiin neljää eri sääntöjen vaatimaa (liite 2) putkikokoa.

Tilauksista tehdessä oli tiedossa, ettei Ruukki välttämättä pysty toimittamaan kaikkia kokoja tilattua määrää, johtuen demoputkivaraston rajallisesta koosta. Koska tiimin putkitarve on suhteellisesti niin pieni, Ruukin ei kannattanut valmistaa putkia erikseen meitä varten. Minimituotantomäärä on useamman kilometrin luokkaa, joka on kymmenien metrien tarpeeseen nähden hyvin paljon. Taloudellisesti se ei olisi ollut

Ruukille ongelma, mutta tiimin rajalliset varastotilat estivät minimituotantomäärän vastaanottamisen. Demovaraston rajallisuudesta johtuen saimme osaa putkista juuri ja juuri riittävän määrän, eikä varaa epäonnistumiseen niiden osalta ollut.

### 3.2 Alihankinta

Rungon osat olisivat periaattessa mahdollista valmistaa itse hyödyntäen Metropolian laboratorioita. Runkoputkien päät voitaisiin valmistaa käsityönä hiomakoneella käyttäen paperisabluunaa putken aukilevityksestä tai sopivalla pyöräsahalla jyrsimessä. Myös kaarien taivuttamiseen tarvittavat työkalut olisivat melko pieni investointi. Johtuen suuresta työmäärästä ja todennäköisesti suuresta hukkakappaleiden määrästä johtuen päädyttiin osien valmistus ulkoistamaan edellisvuosien tapaan. Alihankkijoiksi valikoitui aikaisempina vuosina yhteistyön hyvin hoitaneisiin alihankkijoihin.

Runkoputkien (kuva 7) laserleikkaus suoritettiin Riihimäellä Suomen Putkilaser Oy:ssä. Toimitimme tarvittavat putket ja työkuvat ja saimme viikon toimitusajalla laatikollisen laserleikattuja putkia. Kokoonpanon helpottamiseksi putkiin kaiverrettiin laserilla putkien osanumerot. Kaarien taivutus tapahtui Metallikaari Oy:ssä Keravalla. Rungon pääkaaresta jouduttiin reklamoimaan, koska saatu kaari ei vastannut tarpeeksi tarkasti annettuja mittoja. Tilausta suorittaessa kannattaa määritellä tarkasti tarvittavat toleranssit, jotka ovat formulatyypistä autoa rakentaessa millimetrituokkaa. Rungon kaikki kiinnikkeet ja tuet valmistettiin laserleikkaamalla Keravan Teräsmiehet Oy:ssä.



Kuva 8. Osa runkoputkista laserleikkuun jälkeen

Alihankinnan käyttäminen tässä projektissa oli hyödyllistä taloudellisesti ja työnlaadullisesti. Säästynyt työaika pystyttiin hyödyntämään muihin työkohteisiin, joita ei voitu työn vaativuuden tai taloudellisten syiden takia ulkoistaa. Lisäksi tarkasti laserleikatut tuet ja kiinnikkeet ovat huomattavasti käsin tehtyjä siistimpiä ja edustavampia kilpailun arvostelutilanteissa.

### 3.3 Kokoonpano

Runko rakennettiin koulun hitsauslaboratorion jigipöydällä. Pöydälle on mahdollista rakentaa erittäin jäykkiä tukia, joihin putket voidaan kiinnittää hitsauksen ajaksi. Runko pyrittiin pitämään koko kokoonpanon ajan kiinnitettynä pöytään mahdollisten hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten minimoimiseksi. Johtuen rajallisesta kiinnikkeiden ja tilan määrästä, runkoa jouduttiin osittain irrottamaan jigistä ja tukemaan uudestaan. Sarjatuotannossa runkoa varten valmistettaisiin jigi, johon voisi koota kaikki rungon putket ja hitsata rungon kokoon irrottamatta sitä kertaakaan jigistä. Lisäksi rungon voisi lämpökäsitellä hitsaamisen jälkeen jännitysten poistamiseksi.

rungosta. Täten runko ei eläisi kun se irrotetaan jigistä. Koska formulatiimi tarvitsee kaudessa vain yhden rungon, niin ei ole järkevää rakentaa massatuontantoon soveltuvaa jigii runkoa varten. Koska runkoa ei voida koota yhtenäiseen jigii ja lämpökäsitellä hitsauksen jälkeen, niin rungon pieni kierous on hyväksyttävä osana yksittäiskappaletuotantoa. Runko hitsataan TIG-hitsauksella, koska MIG-hitsauksesta aiheutuvat roiskeet tarttuvat jigii-pöytään kiinni ja pilaavat sen pinnan. Lisäksi osaava TIG-hitsaaja käyttää MIG-hitsausta vähemmän lämpöä sauman luomiseen, mikä vähentää putkien lämpökuormaa ja vähentää putken murtumariskiä hitsisauman vierestä.

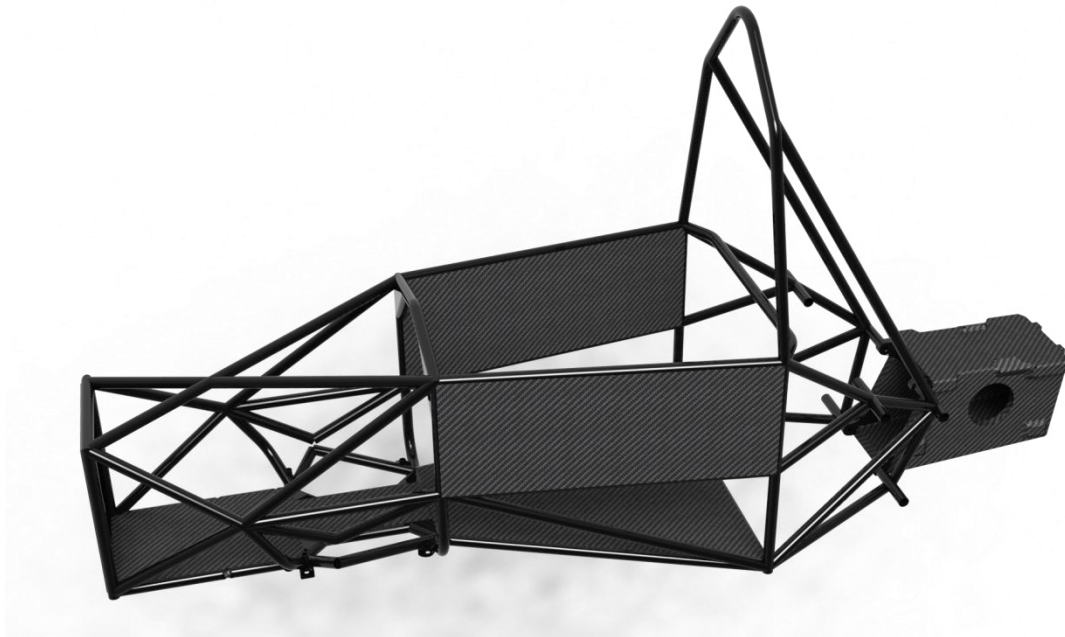
Rungon (kuva 8) kokoaminen aloitetaan pää- ja etukaarista sekä rungon etuosasta. Osakokonaisuudet sijoitetaan tarkasti paikoilleen ja lukitaan puristimilla paikoilleen. Tukien ja puristimien sijoituksessa täytyy huomioida putkien risteyskohdat, jotta niiden lähelle mahtuu hitsaamaan. Kun rungon äärimitat ovat koossa, lisätään väliin loput pääputket ja lopuksi diagonaali- ja muut tukiputket. Runkoon hitsattavat kiinnikkeet asemoidaan paikalleen ja hitsataan runkoon kiinni.



Kuva 9. Runko jigipöydällä

### 3.4 Jälkikäsittely

Rungon kokoamisen jälkeen se pitää valmistella laminointia ja maalausta varten. Epäsiistit hitsausseamit siistitään ja koko runko hiotaan sopivan karheaksi maalausta varten. Rungon komposiittinen pohjalevy ja sivuseinät (kuva 10) laminoidaan runkoon käyttäen valmiiksi laminoituja hiilikuidusta valmistettuja pintalevyjä, kerrosten väliin tulevaa lämmössä sulavaa liimakalvoa ja nomex-paperista hunajakakemaa. Rakenne kootaan runkoon liimaamalla pintalevyt runkoputkiin kiinni ja laittamalla liimakalvot ja ydinaine pintalevyjen väliin. Kun kaikki runkot tulevat vahvikkeet on asennettu paikalleen, runko laitetaan ilmatiiviiseen muovisäkkiin ja kuljetetaan Helsingin Teknillisen korkeakoulun hiilikuitulaboratorioon, jossa säkkiin imetään alipaine ja koko runko laitetaan isoon komposiittien valmistukseen tarkoitettuun uuniin. Uunissa lämpö sulattaa liimakalvon liiman ja säkissä oleva alipaine puristaa pintalevyt ydinainetta vasten. Lämpötilan laskiessa vahvikelevyjen materiaaleista muodostuu erittäin jäykkä ja kevyt komposiittirakenne.



Kuva 10. Runko hiilikuituvahvisteineen

Aikaisempina vuosina tiimin autojen rungot on maalattu pulverimaalilla. Se on erittäin kestävä tapa suojata runko korroosiolta. Kestävyys on tärkeä ominaisuus pinnoinnoitteelta, jotta auto pysyy edustavannäköisenä koko kilpailukauden ajan



pienistä kolhuista huolimatta. HPF010:n runkoa ei voi maalata pulverimaalilla, koska rungon hiilikuituisten vahvikelevyjen hartsi- ja epoksipohjaiset liimat sulaisivat pulverimaalauksen vaatimassa korkealämpötilaisessa uunituksessa. Tämän takia runko päätettiin maalata kaksikomponenttisella kiiltävän mustalla automaalilla. Kaksikomponenttisuudesta johtuen maali kovettuu kemiallisen reaktion avulla ja eikä täten tarvitse uunikuivausta korkeammassa lämpötilassa.

## **4 Kokemukset**

### **4.1 Runkoputkien laserleikkuumenetelmä**

HPF010:n runkoputkien työkuvien uudenlainen aukilevitysmenetelmä todettiin onnistuneeksi uudistukseksi. Kyseinen menetelmä vähensi auton runkoon vaadittavaa työpanosta huomattavasti. Aiemmista vuosista poiketen runkoputkien päiden hiomiseen käsin ei kulunut useaa työpäivää. Vaikka työmäärää saatiin karsittua paljon, niin putkien käsin sovittamisesta ei silti pystytty luopumaan kokonaan. Osaa putkista jouduttiin hiomaan niiden sovittamiseksi runkoon. Tämä johtui rungon mittojen pienistä muutoksista hitsaamisen aiheuttaman lämpölaajenemisen ja puutteellisen jigin takia. Lisäksi putkien päissä ei huomioitu hitsisaumoja, joita ei mallinnettu rungon 3D-malliin. Ongelmasta päästäisiin eroon sarjatuotannossa, jossa runkoa varten tehtäisiin jigi, josta runkoa ei tarvitsisi irrottaa ennen sen valmistumista ja huomioimalla putkenpäiden alle tulevat hitsisaumat jo suunnitteluvaiheessa.

### **4.2 Kiinteä pohjalevy**

Runkoon kiinteästi laminoitu pohjalevy osottautui erittäin toimivaksi ratkaisuksi. Pohjalevy osallistuu aktiivisesti rungon jäykistämiseen, koska ei se pääse liikkumaan runkoon nähden kuten HPF009:n pohjalevy. Pohjalevy kesti kilpailukauden rasitukset jopa ennakoitua paremmin. Kilpailujen välisissä testeissä pohjalevyn todettiin kestävän myös pohjakosketuksia kohtuullisen hyvin. Pohjalevy pystyttiin korjaamaan liimamalla ja kilpailukautta jatkamaan normaalisti tapahtuneen jälkeen. Pohjalevyn ja rungon väliset liimaukset kestivät myös koko kilpailukauden ennakko-odotuksista poiketen.



### 4.3 Ajoasento

Auton ajoasento todettiin kilpailukauden aikana ratin sijoittelua lukuun ottamatta hyväksi. Ratin sijoittelu ei onnistunut huolimatta ajoasennon testaamisesta tilamallilla. Sijoittelu epäonnistui, koska ajoasentoa testasivat vain tiimin pääkuljettajat ja koska tilamallissa ei ollut sivuseiniä kuten varsinaisessa autossa. Tästä johtuen tiimin isompikokoiset kuljettajat eivät mahdu ohjaamoon riittävän mukavasti. Osa kuljettajista ei voi kääntää rattia laidasta laitaan kaksin käsin vaan joutuu irrottamaan alemman kätensä ratista, jotta ratilla on tilaa kääntyä kuljettajan reisien kohdalla.

### 4.4 Takamonokokki

Takamonokokin valmistaminen todettiin hankalaksi tiimin rajallisilla voimavaroilla. Sen valmistuminen viivästyi useiden vastoinikäymisten takia, ja siksi myös koko auton valmistuminen viivästyi. Monokokin valmistamiseen käytettävä alumiininen 5-osainen alumiinimuotti oli myös kallis investointi tiimille. Tasauspyörästön kiinnikkeiden liimaaminen todettiin hankalaksi, koska niiden täytyy olla keskenään täysin suorassa linjassa. Jos kiinnikkeet ovat vinossa, tasauspyörästön epäkeskeiset kiinnikkeet eivät pääse liikkumaan eikä ketjun kiristäminen onnistu. Kiinnikepisteiden tarkka tekeminen monokokkiin todettiin myös hankalaksi. Reikien poraamiseksi ja kierteyttämiseksi monokokki kiinnitettiin muotin osien avulla jyrsimään tarkasti useassa eri asennossa. Useista kiinnityksistä ja mittauksista johtuen kiinnikepisteiden tekeminen vie paljon aikaa.

Kilpailukaudella takamonokin kanssa ei törmätty kuin yhteen ongelmatilanteeseen. Toisen tasauspyörästön kiinnikerenkaan liimaus petti kilpailujen välisissä testeissä Hollannissa. Vika pystyttiin korjaamaan liimaamalla kiinnike uudestaan. Monokokin lujuuslaskelmat pitivät paikkansa ja se kesti koko kauden rasitukset ilman suurempia ongelmia. Perämonokokki osottautui toimivaksi, mutta erittäin työlääksi ratkaisuksi.

## 5 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Kausi 2010 oli tiimin historian pisin kilpailukausi. Tiimi osallistui viiteen kilpailuun, jotka järjestettiin Englannissa, Saksassa, Itävallassa, Unkarissa ja Virossa. Englannin ja Saksan kilpailujen välillä tiimi testasi ja kehitti autoa kahden viikon ajan Hollannin Delftissä ystävyystiimin kanssa. Koska kilpailut järjestettiin kahta ensimmäistä lukuun ottamatta viikon välein päätettiin, ettei tiimi tule kilpailujen välissä Suomeen, vaan tiimin ydinhenkilöt ovat 6 viikkoa kilpailumatkalla. Tämä asetti suuret vaatimukset matkan suunnittelulle, koska mukaan piti mahtua kaikki tarvittava kilpailuissa tarvittava tavara.

Koska auton valmistuminen viivästyi yli kaksi kuukautta, niin testikausi jäi täysin välistä. Autolla ajettiin ensi kertaa tosissaan vasta Englannissa. Testaamisen puute valitettavasti näkyi auton luotettavuudessa ja Englannissa autolla ei saatu laisinkaan ajettuja tuloksia. Auto pyrittiin saamaan kilpailukuntoon ennen Saksan kilpailua, jota pidetään Formula Studentin ja FSAE:n epävirallisina maailmanmestaruuskilpailuina. Siellä autolla saatiin ajettua ensimmäiset tulokset, mutta kilpailu keskeytyi jälleen tekniikkavaikeuksiin kestävyysajossa. Vaikeudet tekniikan kestämisen kanssa jatkuivat myös kaikissa kolmessa kauden epävirallisessa kilpailussa eikä HPF010:llä koskaan päästy kilpailussa maaliin asti.

Rungossa ei todettu kilpailukauden aikana suurempia vikoja eikä auton matka päättynyt rungon takia kertaakaan. Runko oli kauden jälkeen rakenteellisesti ehjä lukuun ottamatta pohjalevyn pientä vauriota, joka syntyi auton pohjan osuessa maahan. Rungon maalaminen kaksikomponenttimaalilla todettiin pulverimaalausta huomommaksi vaihtoehdoksi. Rungossa on sen takia paljon käytön jälkiä kisakauden jäljiltä.

Kauden 2011 autossa rungon hiilikuituvahvisteita on jatkokehitetty. Sivuseiniä on jatkettu koko sivun korkuisiksi, ja ne korvaavat sääntömääräiset ylemmän sivutörmäysputken ja sivutörmäysdiagonaalin. Sivuseinien ja pohjalevyn pintakerrokset ovat muotissa muotoonlaminoituja aikasempien suorien levyjen sijaan. Nomex-paperinen hunajakenno on korvattu kestävämmällä alumiinisellä kennolevyllä. Pohjalevy jatkuu HPF011:sta moottorin alle, mikä jäykistää huomattavasti rungon rakennetta.

Takamonokin valmistaminen todettiin liian hankalaksi ja siitä päätettiin luopua HPF011:ssä. Rakenne korvattiin samankaltaisella lyhyellä perällä kuin HPF008:ssa. Runkoputkien työkuviin uusi valmistusmenetelmä todettiin toimivaksi ja se on edelleen käytössä. HPF011 ei perustu HPF010 runkoon vaan on täysin täysin erilainen johtuen uusista säännöistä, jotka mahdollistavat suunnittelijalle enemmän vapauksia.

Puolitoista vuotta täysipäiväistä työtä Metropolia-Motorsport Formula Student -tiimissä on antanut paljon sellaista kokemusta, jota opinnoissa ei muuten saisi. Lisäksi projektissa on päässyt suunnittelemaan autoja, jotka vastaavat tekniikaltaan oikeita formuloita. Tiiviistä tiimityöskentelykokemuksesta on hyötyä työelämään siirtyessä. Tiimin parasta antia ovat ikimuistoiset kokemukset ja muistot auton suunnittelusta, rakentamisesta, testaamisesta ja ennen kaikkea kilpailemisesta.

## **Lähteet**

- 1 SAE International. 2010. 2010 Formula SAE Rules. SAE International.
- 2 Henningsgaard, Aaron & Yanchar, Chris. 1998. Carbon Fiber Reinforced Steel Spaceframe Techniques, SAE Technical Paper Series 983055. SAE International.
- 3 Adams, Herb. 1993. Chassis Engineering. HPBooks